

УДК 621.01, 621.837.31

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БИОИНСПИРИРОВАННОГО МЕХАНИЗМА НОГИ ГАЛОПИРУЮЩЕГО РОБОТА-ГЕПАРДА

И.И. Борисов, С.А. Колюбин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
 Адрес для переписки: borisovii@itmo.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 15.05.19, принята к печати 29.07.19  
 Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Борисов И.И., Колюбин С.А. Энергетический анализ биоинспирированного механизма ноги галопирующего робота-гепарда // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 1106–1114. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты исследования методов проектирования локомоторных роботов на примере создания высокоскоростного, энергоэффективного робота-гепарда, способного перемещаться по пересеченной местности. Рассмотрен энергетический анализ механизма бедра ноги робота, принцип работы которого основан на резонансе гибкого элемента, вызванного автоколебаниями инерционной массы. Разработанная конструкция рассмотрена в виде модели перевернутого пружинного маятника, гибкий элемент которого необходим для обеспечения гармонического поведения тела робота, стабильного взаимодействия с поверхностью пола, поглощения ударной силы и рекуперации энергии перемещения. **Метод.** При проектировании биоинспирированных робототехнических устройств предложено использовать методы биомиметики, которые заключаются в воспроизведении уникальных качеств и характеристик живых систем, а не только в имитации внешнего вида. Представленная конструкция имитирует динамику ноги прыгающего животного благодаря гармоническому характеру перемещения, вызванного вынужденной периодической силой инерции массы тела робота. Гармоническое усилие, вызывающее автоколебания, выведено с помощью уравнения динамики Лагранжа. Приведено обобщенное описание динамики робота в виде структуры Пуассона, используемой при представлении системы при помощи порт-Гамильтонового подхода. **Основные результаты.** Получены временные зависимости обмена энергиями и мощностями: для пружинного маятника при наличии и отсутствии внешней возбуждающей силы; механизма бедра, названного «минитаур» при наличии и отсутствии внутренней инерционной силы, вызывающей автоколебания инерционной массы тела робота в режиме прыжка на месте. Представлены графики зависимостей коэффициента затрат энергии на перемещение от конфигурации механизма и жесткости пружины при беге. **Практическая значимость.** Представленный анализ необходим для определения количества энергии в системе, выявления способов сохранения энергетического бюджета, причин его расходования и способов восполнения.

### Ключевые слова

галопирующий робот, энергетический анализ машин, энергоэффективность

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Университета ИТМО (проект № 418233).  
 Авторы выражают особую благодарность Стефано Страмиджиоли за оказанную помощь в данной работе.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114

## ENERGY-BASED ANALYSIS OF BIOINSPIRED MECHANISM FOR CHEETAH ROBOT LEG

I.I. Borisov, S.A. Kolyubin

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
 Corresponding author: borisovii@itmo.ru

### Article info

Received 15.05.19, accepted 29.07.19  
 Article in Russian

**For citation:** Borisov I.I., Kolyubin S.A. Energy-based analysis of bioinspired mechanism for cheetah robot leg. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 1106–1114 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1106-1114

### Abstract

**Subject of Research.** The paper analyzes design methods of locomotion robots on the example of high-speed, energy-efficient cheetah robot creation which is able to move over rough terrain. The paper describes a femur mechanism energy analysis of

the cheetah robot leg. The operation principle is based on flexible element resonance caused by self-oscillations of the robot inertial mass. The developed design is considered as a spring-loaded inverted pendulum with the flexible element necessary to ensure the harmonic behavior of the robot body, stable interaction with the ground, absorption of impact force and recuperation of the locomotion energy. **Method.** We proposed the application of biomimetic methods in the design of bio-inspired robotic devices. Their essence lies in reproducing the unique qualities and characteristics of living systems, rather than only an imitation of physical configuration. The design presented in the paper imitates the dynamics of a jumping animal due to the movement harmonic nature caused by a periodic inertia force of the robot body mass. The harmonic force, which causes self-oscillations, is derived by the Lagrange dynamic equation. A generalized description of the robot dynamics is represented in the Poisson structure used in the system concept by means of the Port-Hamilton approach. **Main Results.** As a result of the simulation, we have obtained energy and power exchange graphs for a spring pendulum with and without external harmonic force. The same graphs with and without internal inertial force for jumping in place are given for a femur mechanism, called "minitaur". The diagrams of dependencies between the cost of transport coefficients and the configuration of the mechanism and the spring stiffness for a running behavior are presented. **Practical Relevance.** The given analysis is required for determination of the amount of energy in the system, the ways of energy budget conservation, the reasons for its consumption and how it can be replenished. In the following publications, a similar analysis will be presented for the entire leg of the cheetah-robot, imitating the tibia and metatarsus bones.

### Keywords

legged robot, energy analysis, energy-efficiency

### Acknowledgements

This work is supported by ITMO University grant (project No. 418233).

The authors express special gratitude to Stefano Stramigioli for assistance in this study.

## Введение

Галоп животных как поперечный, свойственный лошадям, так и вращательный, присущий, например, гепарду и борзой собаке [1], является источником вдохновения для создания искусственных галопирующих локомоционных систем [2]. Перенести уникальные свойства и характеристики живой природы в робототехнические системы возможно с помощью методов биомиметики, заключающихся в создании технологических объектов путем заимствования идей и основных элементов из живой природы, отточенных миллионами лет эволюции. Анализируя строение и динамику живых организмов, важно повторить не внешний вид, а уникальные характеристики, такие как: скорость, энергоэффективность и способность перемещаться по пересеченной местности.

Было разработано большое количество шагающих и бегающих роботов, но ни один из них не приблизился к характеристикам кошачьих или псовых. Например, большинство разработанных на данный момент шагающих двуногих роботов, такие как Asimo [3], Hubo [4] и пр., осуществляют *статическую локомоцию*, т. е. при ходьбе они переносят центр массы над рабочей ногой. Подобные роботы очень универсальны: они способны ходить с разной скоростью, подниматься по лестнице, но остается одна проблема, а именно, энергопотребление. Данные роботы, несмотря на ранцы с батареями, работают не больше часа [5]. Проблема энергоэффективности также актуальна и для бегающих роботов, например, таких как BigDog [6] и MIT Cheetah robot [7].

Распространено два основных способа повышения энергоэффективности локомоционных роботов: разработка роботов, осуществляющих *динамическую локомоцию*, при которой центр массы робота не обязательно должен располагаться над площадью контакта [8], и использование гибких элементов в конструкции, способных осуществлять накопление кинетической или потенциальной энергии и ее рекуперацию [9]. Энергоэффективность пассивных шагающих роботов, осуществляющих динамическую локомоцию, была доказана в [10], однако пассивные шагающие роботы способны перемещаться только по абсолютно ровной и наклонной плоскости.

Работы [2, 9, 11, 12] посвящены созданию робота-гепарда с гибким позвоночником, используя морфологический принцип синтеза конструкции. В [9] представлены результаты повышения энергоэффективности перемещения с помощью добавления в конструкцию гибкой спины, анатомически идентичной реальному гепарду. В работе было продемонстрировано существенное повышение энергоэффективности, но вместе с этим и усложнение системы управления. В [11, 12] представлена разработка робота-гепарда, горизонтальное перемещение которого осуществляется только с помощью работы гибкой спины. Разработанный робот способен перемещаться с очень небольшой скоростью, однако характер его бега идентичен вращательному галопу реального гепарда. Для повышения скорости перемещения была разработана новая конструкция механизма бедра, представленная в [13].

Данная статья посвящена энергетическому анализу механизма ноги робота-гепарда, работа которой представляет собой периодическую локомоцию, при которой движение вызывается резонансом гибкого элемента, расположенного в робототехнической системе. Автоколебательный режим работы локомоционных роботов необходим для повышения энергоэффективности робота, так как гибкие элементы способны накапливать энергию, поглощая удар при приземлении робота.

Энергия в мехатронных системах

Энергия — язык общения между элементами робототехнической системы. При работе мехатронного устройства происходит обмен энергией между ее компонентами и окружающим миром. Например, автомобиль едет не потому, что двигатель передает крутящий момент на колеса, а потому что энергия горения топлива была преобразована двигателем и колесами в кинетическую энергию автомобиля. Беря во внимание обмен энергий и мощностей между составными частями робототехнической системы, последняя может быть оптимизирована для повышения производительности и энергоэффективности.

Целью проводимого исследования является разработка более энергоэффективного локомотивного робота с большим запасом хода и длительностью работы на одном заряде батареи по сравнению с ранее разработанными устройствами. Добиться энергоэффективности можно за счет бережливой траты энергетического бюджета, беря во внимание количество всей энергии в системе. Разрабатываемая конструкция задней ноги робота-гепарда должна обеспечивать грацию бега реального гепарда. В данной работе предлагается шаг по направлению к более совершенным локомотивным роботам, динамика которых основана на автоколебальном режиме работы. Резонансный характер поведения робота способен обеспечить элегантное движение и улучшить энергоэффективность подобно реальным животным.

Шагающие и бегающие роботы чаще всего описываются моделями IP (*inverted pendulum* — обратный маятник) и SLIP (*spring loaded inverted pendulum* — нагруженный пружиной обратный маятник) соответственно [11]. Механизм ноги представляют в виде массы на пружине, жесткость которой напрямую влияет на скорость перемещения и на энергозатраты. Пружина моделирует гибкость ноги, необходимую для поглощения удара о поверхность пола и абсорбирования его неровностей. Роль эластичных элементов в анатомии реальных животных играют мышцы и сухожилия.

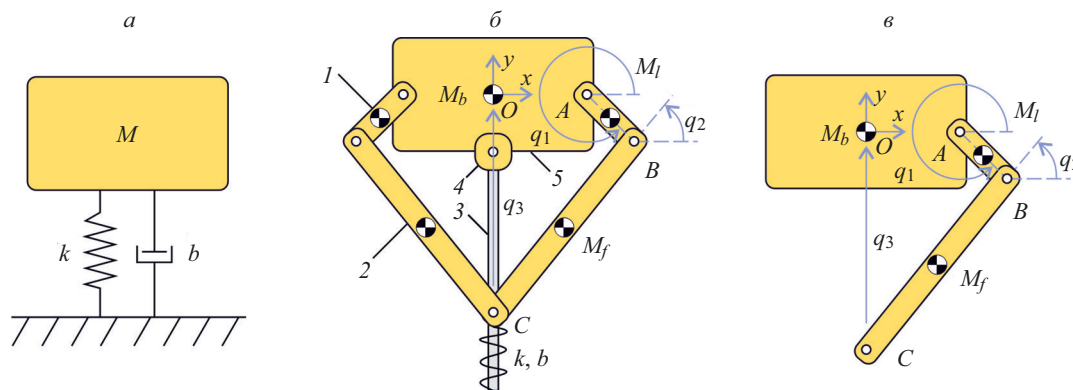


Рис. 1. а — система масса–пружина–демпфер жесткостью  $k$  и демпфированием  $b$ ; б — схематичное представление бедра ноги робота: 1 — кривошпы, 2 — шатуны, 3 — кулиса, 4 — камень, 5 — тело робота,  $C$  — точка крепления гибкого элемента для взаимодействия с полом; в — упрощенное представление для вывода уравнения движения в трех обобщенных координатах: угла поворота кривошипа  $q_1$ , угла поворота шатуна  $q_2$  и вертикального перемещения  $q_3$ .

Остальные обозначения см. в тексте.

Рассмотрим характер поведения системы масса-пружина-демпфер, изображенной на рис. 1, а, с точки зрения обмена энергиями и мощностями.  $M$  — масса тела робота, кг;  $k$  — жесткость пружины, Н/м;  $b$  — коэффициент демпфирования, Н/(м/с). Если на тело не приложена внешняя нагрузка и коэффициент демпфирования  $b$  равен нулю, то система является консервативной, и она может быть описана каноническими уравнениями Гамильтона:

$$H = K + P = \frac{p^2}{2m} + \frac{q^2}{2C},$$

$$F = \frac{\partial q}{\partial t} = - \frac{\partial H}{\partial q} = - \frac{q}{C},$$

$$v = \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial p} = \frac{p}{m},$$

где  $K$  — кинетическая энергия, Дж;  $P$  — потенциальная энергия, Дж;  $p$  — обобщенный импульс, кг·м/с;  $q$  — перемещение, м;  $C = 1/k$  — податливость пружины, м/Н;  $k$  — жесткость пружины, Н/м;  $v$  — скорость тела, м/с;  $m$  — масса, кг.

Однако в большинстве случаев к системе приложена внешняя нагрузка, и коэффициент демпфирования  $b$  отличен от нуля. По этой причине удобнее описывать систему более общим представлением в виде структуры Пуассона, используемой при описании системы с помощью порт-Гамильтонового подхода [5, 11]:

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} + \mathbf{g}u = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ p \\ m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}u, \quad (1)$$

$$y = \mathbf{g}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} = (0 \quad 1) \begin{bmatrix} q \\ p \\ m \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{x} = (q \quad p)^T$  — вектор состояния;  $\mathbf{J}$  — кососимметричная матрица, описывающая, как элементы системы соединены между собой;  $\mathbf{R}$  — матрица диссипации энергии;  $\mathbf{g}$  — вектор, описывающий взаимодействие с окружающим миром;  $u$  — обобщенная внешняя сила (вход системы);  $y$  — обобщенная скорость системы (выход системы).

Перемножение выхода на вход есть мощность  $P = y^T u$ . Механическая мощность массы, пружины и демпфера соответственно в Вт:

$$P_M = vF_M = v\dot{p},$$

$$P_C = vF_C = v \frac{q}{C},$$

$$P_R = vF_R = -v^2 b.$$

Рассеянная энергия на демпфере равна:

$$D = \int F_b v dt = \int b v^2 dt.$$

На рис. 2 представлены результаты симуляции поведения тела массой  $m = 1$  кг, расположенного на высоте 1 м, связанного со стойкой пружиной жесткостью  $k = 10$  Н/м, параллельно соединенной с демпфером с коэффициентом  $b = 0,5$  Нс/м, ускорение свободного падения  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. На рис. 2, *a* приведены результаты симуляции без внешней силы, на рис. 2, *б* — с приложенной внешней нагрузкой, возбуждающей автоколебания.

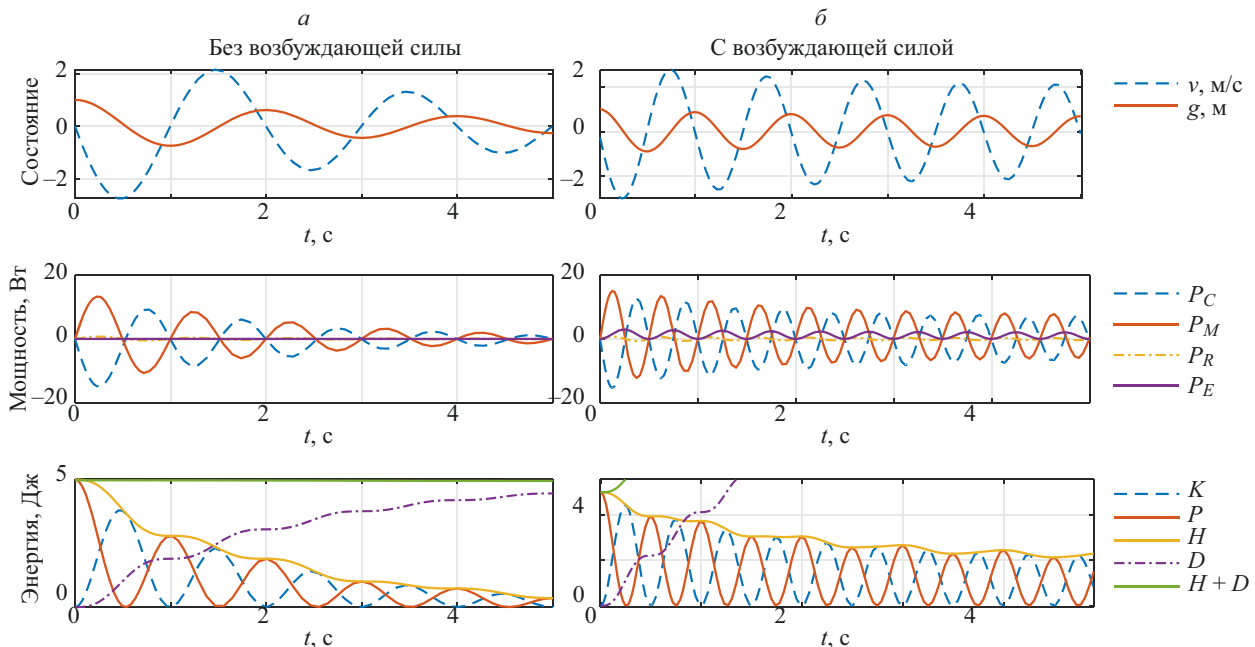


Рис. 2. Результаты симуляции системы масса-пружина-демпфер без (*a*) и с возбуждающей (*б*) периодической силой  $F_E$

Первый график показывает положение тела  $q$  и скорость его перемещения  $v$ . Так как в этом примере нет моделирования соударения с полом, тело способно опускаться ниже поверхности пола без потерь энергии на соударение. Второй график демонстрирует преобразование мощности перемещения тела  $P_M$  в мощность пружины  $P_C$  и обратно,  $P_R$  — мощность силы демпфирования,  $P_E$  — мощность внешней силы. Третий график изображает переход потенциальной энергии тела в кинетическую и обратно с рассеиванием

на демпфере. Сумма кинетической  $K$  и потенциальной  $P$  энергий обозначена Гамильтонианом  $H$ . Сумма  $H$  и  $D$  — общее количество энергии, пройденной через систему.

На рис. 2, *а* в случае отсутствия внешней периодической силы видно, как положение, скорость, мощности и энергии затухают с течением времени, а сумма всей энергии в системе постоянна. На рис. 2, *б* изображены аналогичные характеристики в случае приложения внешней переменной силы  $F_E$ , компенсирующей рассеянную энергию в системе, т. е. силы, возбуждающей вынужденные колебания массы:

$$F_E(t) = F_0 \sin(\omega_0 t), \quad (2)$$

$$F_0 = mg \approx 1, \text{ Н},$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{2m^2}} \approx 3,14 = \pi, \text{ рад/с}, \quad (3)$$

где  $F_0$  и  $\omega$  — соответственно амплитуда и циклическая частота вынуждающей силы. Мощность внешней силы обозначена как  $P_E$ . По прошествии 10 с система выходит на устоявшийся режим, Гамильтониан принимает постоянное значение, тело колеблется с постоянной амплитудой и скоростью.

Из структуры Пуассона (1) получаем уравнение движения:

$$\dot{p} = -\frac{q}{C} - \frac{P}{m} b - F_E = -F_{\text{пр}} - F_E,$$

$$F_{\text{пр}} = -(F_E + \dot{p}) = -F_{C_y},$$

где  $F_{\text{пр}}$  — сила, создаваемая пружиной,  $F_{C_y}$  — обобщенная сила в системе по оси  $y$ , приложенная в точке  $C$ .

### Анализ механизма бедра ноги

В представленном выше примере приложенная нагрузка была внешней, а колебания вынужденными. Робот же должен быть автономным, поэтому колебания должны быть самозарождающимися, т. е. автоколебаниями. Колебания должны возникать и поддерживаться от источника энергии не колебательной природы, причем источник должен быть включен в систему. Вызвать автоколебания тела можно добавив к нему, например, кривошипно-ползунный механизм, постоянное вращение кривошипа которого приведет к появлению гармонической силы инерции тела.

В качестве механизма бедра ноги был предложен механизм, носящий название «минитаур», представляющий собой два зеркально соединенных кривошипно-ползунных механизма [14]. Оба кривошипа приводятся в движение от одного двигателя с помощью планетарного редуктора, угол между кривошипами задается серводвигателем. Если между кривошипами нет фазы и они вращаются в противоположных направлениях, то получаем обратный маятник с внутренним источником автоколебаний, способный осуществлять прыжок на месте, так как точка контакта с полом находится точно под центром тяжести. При изменении угла между кривошипами траектория перемещения точки контакта с полом изменяется с появлением горизонтальной составляющей, что приводит к бегу робота. Механизм способен изменять траекторию бега плавно, поэтому при беге точка контакта с полом не обязательно должна располагаться над центром масс, осуществляя *динамическую локомоцию*.

Проведем энергетический анализ с выводом дифференциального уравнения динамики робота. Механизм представляет собой замкнутую кинематическую цепь с голономными связями. Используя уравнения Лагранжа, составим уравнение динамики ноги робота для кинематической схемы, изображенной на рис. 1, *в*.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_C,$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} I_1 + l_{AB}^2 M_f + \frac{1}{4} l_{AB}^2 M_l & -\frac{1}{2} l_{AB} l_{BC} M_f \cos(q_1 - q_2) & \gamma \cos q_1 \\ -\frac{1}{2} l_{AB} l_{BC} M_f \cos(q_1 - q_2) & I_f + \frac{1}{4} l_{BC}^2 M_f & -\frac{1}{2} l_{BC} M_f \cos q_2 \\ \gamma \cos q_1 & -\frac{1}{2} l_{BC} M_f \cos q_2 & M_b + M_L \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} l_{AB} l_{BC} M_f \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_2 & 0 \\ \frac{1}{2} l_{AB} l_{BC} M_f \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ -\gamma \sin q_1 \dot{q}_1 & \frac{1}{2} l_{BC} M_f \sin q_2 \dot{q}_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{N}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \gamma \cos q_1 g \\ -\frac{1}{2} l_{BC} M_f \cos q_2 g \\ (M_b + M_L) g \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_C = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l_{AB} \sin q_1 & l_{AB} \cos q_1 \\ l_{BC} \sin q_2 & -l_{BC} \cos q_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Cx} \\ F_{Cy} \end{bmatrix},$$

где  $\gamma = l_{AB} \left( \frac{1}{2} M_l + M_f \right)$ ,  $M_L = M_l + M_f$ ,  $I_l = \frac{1}{12} M_f l_{BC}^2$ ,  $I_f = \frac{1}{12} M_f l_{BC}^2$  — момент инерции шатуна  $AB$ , кг·м<sup>2</sup>,  $M_b$  — масса тела, кг;  $M_l$  — масса кривошипа  $AB$ , кг,  $M_f$  — масса шатуна  $BC$ , кг;  $l_{AB}$  — длина кривошипа  $AB$ , м,  $l_{BC}$  — длина кривошипа  $BC$ , м.

В рамках проводимого анализа интересуют обобщенная гармоническая сила по вертикали, возбуждающая автоколебания тела робота:

$$F_{Cy} = \gamma \left( \cos q_1 \ddot{q}_1 - \sin q_1 \dot{q}_1^2 \right) + \frac{1}{2} l_{BC} M_f \left( \sin q_2 \ddot{q}_2^2 - \cos q_2 \dot{q}_2^2 \right) + (M_b + M_L) (\ddot{q}_3 + g) \quad (4)$$

Анализ динамики робота проводился вместе с построением имитационной модели устройства в MATLAB Simscape Multibody. Характеристики анализируемого робота представлены в таблице.

Таблица. Физические параметры прыгающего робота

Символ	$M_b$	$M_l$	$M_f$	$l_{AO}$	$l_{AB}$	$l_{BC}$	$k$	$b$	$\omega$
Значение	0,7	0,02	0,08	6,4	2	20	600	1	$4\pi$
СИ	кг	кг	кг	см	см	см	Н/м	Нс/м	рад/с

В отличие от предыдущего варианта с анализом пружинного маятника (рис. 1, а) в этом примере рассматривается моделирование удара о поверхность пола. Для нормальной реакции используется линейная вязкоупругая модель:

$$F_{уд} = -k_K x_K - b_K v,$$

где  $k_K$  — коэффициент жесткости контактного взаимодействия, Н/м;  $x_K$  — пересечение взаимодействующих тел, м;  $b_K$  — коэффициент диссипации контактного взаимодействия, Нс/м;  $v$  — скорость демпфирования при контактном взаимодействии, м/с.

В случае моделирования робота без гибкого элемента сила соударения с полом  $F_{уд}$  равна обобщенной расчетной силе  $F_{Cy}$ . На рис. 3 представлено сравнение значений расчетной величины обобщенной силы  $F_{Cy}$  и моделируемого усилия взаимодействия робота с полом. Совпадение графиков подтверждает правильность полученного выражения для возбуждающей силы и коэффициентов взаимодействия.

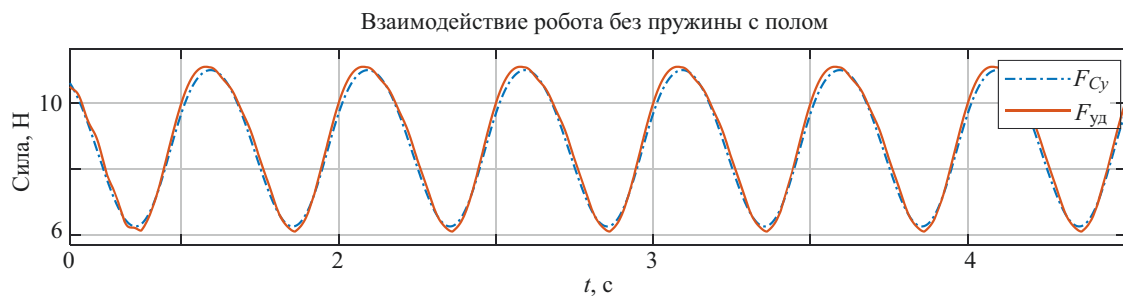


Рис. 3. Сравнение расчетной силы  $F_{Cy}$  и реакционной силы взаимодействия  $F_{уд}$

В случае добавления гибкого элемента сила удара о пол  $F_{уд}$  будет равна сумме расчетной обобщенной силы  $F_{Cy}$  и усилия, создаваемого в пружине  $F_{пр}$ . Механизм ноги, изображенный на рис. 1, б, был промоделирован на контактное взаимодействие с полом. Сравнение рассчитанного значения контактного взаимодействия  $F_{Cy} + F_{пр}$  и аналогичного значения из симуляционной модели  $F_{уд}$  представлено на рис. 4.

Сила  $F_{Cy}$  (4) носит переменный характер и может быть представлена в форме периодической функции (2). Циклическая частота колебаний аналогично может быть подсчитана формулой (3). В порт-Гамильтоновой форме (1) уравнение движения будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = (\mathbf{J} - \mathbf{R}) \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} F_{уд},$$

где  $\mathbf{q} = (q_1 \ q_2 \ q_3)^T$  — вектор обобщенных координат,  $\mathbf{p} = (p_1 \ p_2 \ p_3)^T$  — вектор обобщенных импульсов,  $F_{уд}$  — внешняя сила удара о пол. Заметим, что сила  $F_{Cy}$  является силой инерции, поэтому вход системы равен только силе удара о пол  $u = F_{уд}$ .

На рис. 5, а показан процесс затухания колебаний при свободном падении ноги робота с выключенным двигателем. Виден переход потенциальной энергии  $P$  в кинетическую  $K$  до соударения с полом, после удара вся кинетическая энергия тела  $K$  переходит в потенциальную энергию пружины  $S$ , которая спуска

мгновение передает ее обратно телу. Однако с каждым ударом происходит диссипация части энергии, что в результате приведет к затуханию колебаний.  $H$  — Гамильтониан, сумма кинетической и потенциальной энергий тела,  $D$  — рассеянная энергия,  $T$  — сумма энергии тела  $H$  и энергии пружины  $S$ . На рис. 5, б изображен переход энергий в случае вращения кривошипов со скоростью 4л рад/с. Видно, как сумма энергии робота приобретает устойчивые значения.

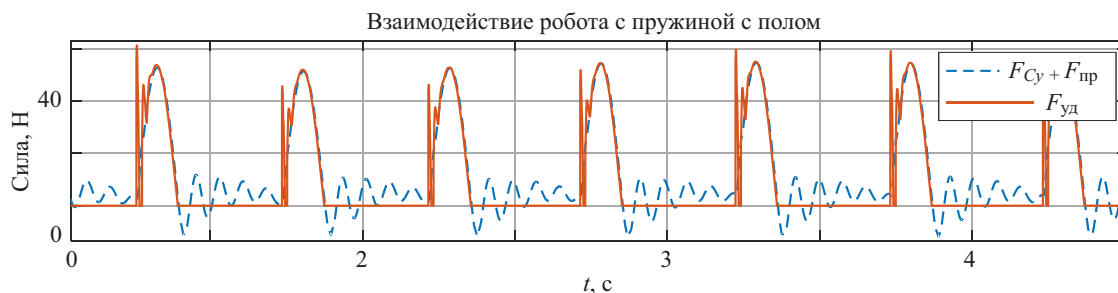


Рис. 4. Сравнение расчетной силы удара  $F_{Cy} + F_{пр}$  и реакционной силы взаимодействия  $F_{уд}$

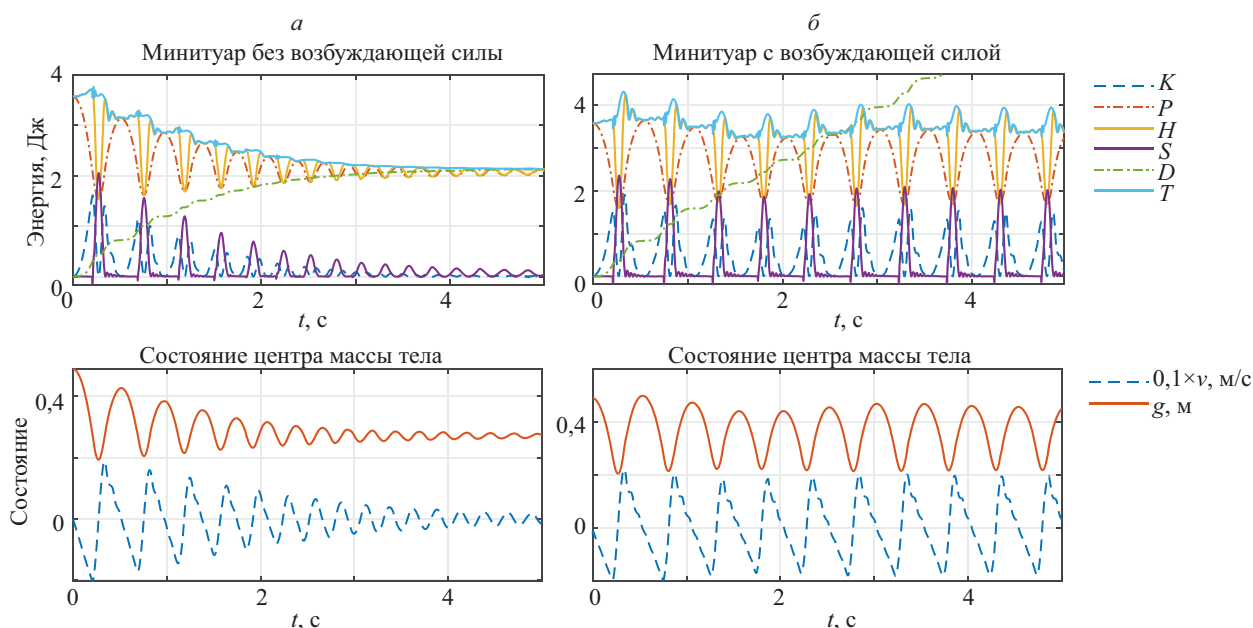


Рис. 5. Минитуар с выключенным мотором (а) и с включенным мотором (б)

Был представлен анализ динамики и поведения механизма бедра робота-гепарда при прыжке на месте, т.е. только при вертикальном перемещении. Не менее важным является способность механизма осуществлять горизонтальное перемещение (рис. 6).

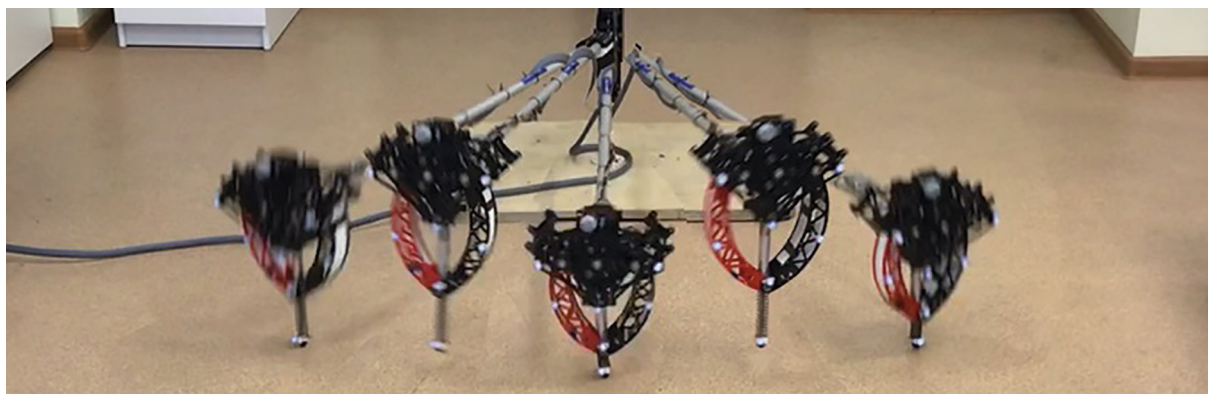


Рис. 6. Бег прототипа конструкции бедра ноги робота-гепарда

При беге важной характеристикой является коэффициент затрат энергии на перемещение КЗП (cost of transport), равного отношению потраченной энергии к произведению веса робота на его преодоленную дистанцию [7]. На рис. 7, а изображена зависимость КЗП от фазы между кривошипами. С увеличением фазы существенно увеличиваются скорость бега и пройденное расстояние за 10 с моделирования (рис. 7, б).

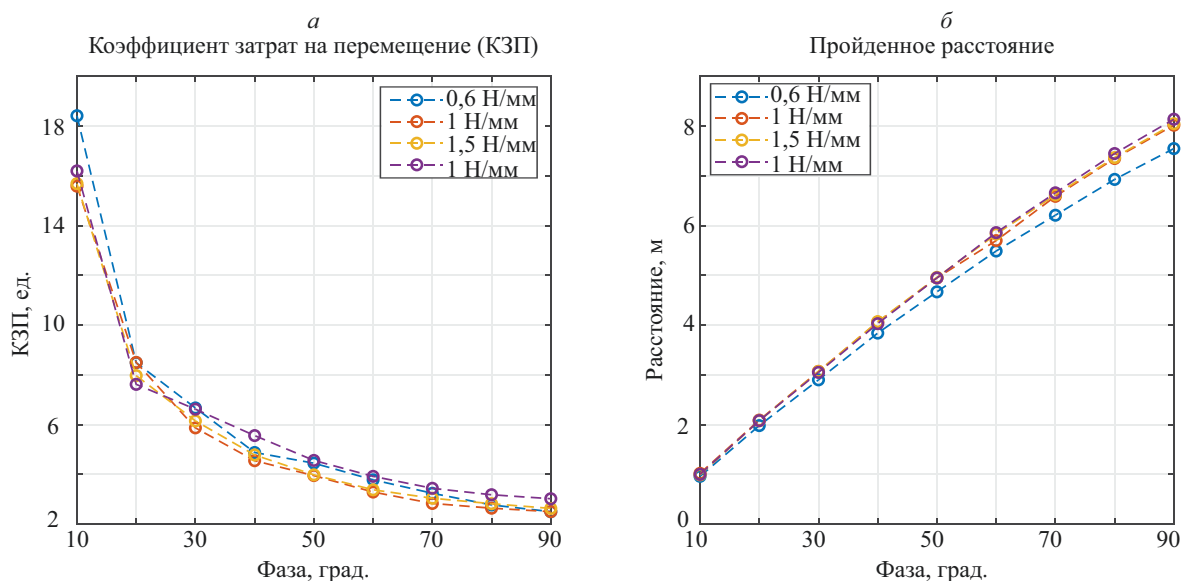


Рис. 7. Зависимость коэффициента затрат энергии на перемещение (КЗП) (а) и пройденного расстояния (б) от фазы между кривошипами и жесткостью гибкого элемента

### Заключение

Представленный в данной статье анализ прыгающего бедра ноги робота-гепарда необходим для понимания поведения робота с точки зрения обмена энергией с окружающей средой. Полученные графики наглядно демонстрируют потерю всей кинетической энергии тела при ударе о пол, которая, однако, может быть сохранена и использована при последующем прыжке благодаря использованию пассивных гибких элементов. Резонанс пружины и автоколебания инерционной массы, вызванные быстро вращающимися кривошипами, являются ключом к обеспечению стабильной динамической локомоции, необходимой для повышения энергоэффективности робота. Механизм бедра способен самостоятельно прыгать и бегать, однако траектория точки контакта с полом может быть увеличена для осуществления более высокого и длинного прыжка, расширив механизм до целой ноги с имитацией большой, малой берцовых костей и плюсны. Следующим этапом к построению робота является синтез, проектирование и анализ всей ноги робота.

### Литература

- Bertram J.E.A., Gutmann A. Motions of the running horse and cheetah revisited: fundamental mechanics of the transverse and rotary gallop // *Journal of the Royal Society Interface*. 2009. V. 6. N 35. P. 549–559. doi: 10.1098/rsif.2008.0328
- Wanders I., Folkertsma G.A., Stramigioli S. Design and analysis of an optimal hopper for use in resonance-based locomotion // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*. 2015. P. 5197–5202. doi: 10.1109/ICRA.2015.7139923
- Sakagami Y., Watanabe R., Aoyama C., Matsunaga S., Higaki N., Fujimura K. The intelligent ASIMO: System overview and integration // *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2002. V. 3. P. 2478–2483.
- Park I.W., Kim J.-Y., Lee J., Oh J.-H. Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot 3: HUBO) // *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2005. P. 321–326. doi: 10.1109/ICHR.2005.1573587
- Duindam V., Stramigioli S. *Modeling and Control for Efficient Bipedal Walking Robots: A Port-Based Approach*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 214 p. doi: 10.1007/978-3-540-89918-1
- Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot // *IFAC Proceedings Volumes*. 2008. V. 41. N 2. P. 10822–10825. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833

### References

- Bertram J.E.A., Gutmann A. Motions of the running horse and cheetah revisited: fundamental mechanics of the transverse and rotary gallop. *Journal of the Royal Society Interface*, 2009, vol. 6, no. 35, pp. 549–559. doi: 10.1098/rsif.2008.0328
- Wanders I., Folkertsma G.A., Stramigioli S. Design and analysis of an optimal hopper for use in resonance-based locomotion. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015)*, 2015, pp. 5197–5202. doi: 10.1109/ICRA.2015.7139923
- Sakagami Y., Watanabe R., Aoyama C., Matsunaga S., Higaki N., Fujimura K. The intelligent ASIMO: System overview and integration. *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, vol. 3, pp. 2478–2483.
- Park I.W., Kim J.-Y., Lee J., Oh J.-H. Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST humanoid robot 3: HUBO). *Proc. 5<sup>th</sup> IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2005, pp. 321–326. doi: 10.1109/ICHR.2005.1573587
- Duindam V., Stramigioli S. *Modeling and Control for Efficient Bipedal Walking Robots: A Port-Based Approach*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 214 p. doi: 10.1007/978-3-540-89918-1
- Raibert M., Blankespoor K., Nelson G., Playter R. Bigdog, the rough-terrain quadruped robot. *IFAC Proceedings Volumes*,



7. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Hyun D.J., Lee J., Otten D.M., Lang J.H., Kim S. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015. V. 20. N 3. P. 1117–1129. doi: 10.1109/TMECH.2014.2339013
8. Cotton S., Olaru I.M.C., Bellman M., Van Der Ven T., Godowski J., Pratt J. FastRunner: A fast, efficient and robust bipedal robot. concept and planar simulation // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*. 2012. P. 2358–2364. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225250
9. Folkertsma G.A., Kim S., Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine // *Proc. 25<sup>th</sup> IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*. 2012. P. 2210–2215. doi: 10.1109/IROS.2012.6385870
10. Tedrake R., Zhang T.W., Fong M.-F., Seung H.S. Actuating a simple 3D passive dynamic walker // *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04*. 2004. N 5. P. 4656–4661.
11. Folkertsma G.A. *Energy-based and biomimetic robotics*. University of Twente, 2017. doi: 10.3990/1.9789036543163
12. Folkertsma G.A., van der Schaft A.J., Stramigioli S. Morphological computation in a fast-running quadruped with elastic spine // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. V. 48. N 13. P. 170–175. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.10.234
13. Snippe M. *Cheetah robot leg mechanism: analysis, design and cost of transport*. University of Twente, 2017.
14. Kenneally G., De A., Koditschek D.E. Design principles for a family of direct-drive legged robots // *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2016. V. 1. N 2. P. 900–907. doi: 10.1109/LRA.2016.2528294
- 2008, vol. 41, no. 2, pp. 10822–10825. doi: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01833
7. Seok S., Wang A., Chuah M.Y., Hyun D.J., Lee J., Otten D.M., Lang J.H., Kim S. Design principles for energy-efficient legged locomotion and implementation on the MIT cheetah robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, vol. 20, no. 3, pp. 1117–1129. doi: 10.1109/TMECH.2014.2339013
8. Cotton S., Olaru I.M.C., Bellman M., Van Der Ven T., Godowski J., Pratt J. FastRunner: A fast, efficient and robust bipedal robot. concept and planar simulation. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, 2012, pp. 2358–2364. doi: 10.1109/ICRA.2012.6225250
9. Folkertsma G.A., Kim S., Stramigioli S. Parallel stiffness in a bounding quadruped with flexible spine. *Proc. 25<sup>th</sup> IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012)*, 2012, pp. 2210–2215. doi: 10.1109/IROS.2012.6385870
10. Tedrake R., Zhang T.W., Fong M.-F., Seung H.S. Actuating a simple 3D passive dynamic walker. *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04*, 2004, no. 5, pp. 4656–4661.
11. Folkertsma G.A. *Energy-based and biomimetic robotics*. University of Twente, 2017. doi: 10.3990/1.9789036543163
12. Folkertsma G.A., van der Schaft A.J., Stramigioli S. Morphological computation in a fast-running quadruped with elastic spine. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 13, pp. 170–175. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.10.234
13. Snippe M. *Cheetah robot leg mechanism: analysis, design and cost of transport*. University of Twente, 2017.
14. Kenneally G., De A., Koditschek D.E. Design principles for a family of direct-drive legged robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, vol. 1, no. 2, pp. 900–907. doi: 10.1109/LRA.2016.2528294

#### Авторы

**Борисов Иван Игоревич** — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57200417949, ORCID ID: 0000-0003-0168-6609, borisovii@itmo.ru  
**Колюбин Сергей Алексеевич** — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 35303066700, ORCID ID: 0000-0002-8057-1959, s.kolyubin@corp.ifmo.ru

#### Authors

**Ivan I. Borisov** — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57200417949, ORCID ID: 0000-0003-0168-6609, borisovii@itmo.ru  
**Sergey A. Kolyubin** — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 35303066700, ORCID ID: 0000-0002-8057-1959, s.kolyubin@corp.ifmo.ru